

ЭПТ 2015



ACED 2015

УДК 621.313.3

5.6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ТЯГОВОГО ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

MODELING OF THERMAL REGIMES OF TRACTION LINEAR INDUCTION MOTOR

Сарапулов Федор Никитич, доктор техн. наук, профессор каф. «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: sarapulovfn@yandex.ru. Тел.: +79506436565

Сарапулов Сергей Федорович, доктор техн. наук, директор Уральского энергетического института Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: sarapuloff@yandex.ru

Родионов Игорь Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент каф. «Электрические машины» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. Тел. 343 3754573

Шымчак Петр, кандидат технических наук, адъюнкт кафедры «Электрические машины и электроприводы» Западнопоморского технологического университета, Польша, E-mail: piotr.szymczak@zut.edu.pl. Тел.: +4891 4494212

Fedor F. Sarapulov, Dr. Sc., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: sarapulovfn@yandex.ru. Ph.: +79506436565

Sergej F. Sarapulov, Dr. Sc., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: sarapulovfn@yandex.ru. Ph.: +79506436565

Igor E. Rodionov, Cand. Sc., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. Ph.: 343 3754573

Piotr P. Szymczak, Cand. Sc., Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, 70-313, Szczecin, ul. Sikorskiego, 37. E-mail: piotr.szymczak@zut.edu.pl. Ph.: +4891 449421

Аннотация. В докладе представлена упрощенная математическая модель линейного асинхронного двигателя для исследования его тепловых режимов. Модель учитывает вынос тепла из активной зоны за счет движения вторичного элемента. Дана оценка влияния скорости двигателя на температуры элементов его конструкции.

Abstract. The report presents a simplified mathematical model of linear induction motor to study its thermal regimes. The model takes into account the heat removal from the active zone due to the movement of the secondary element. The estimation of influence of motor speed on the temperature of the elements of its design.

Ключевые слова: линейный асинхронный двигатель, модель, нагрев, элементы конструкции, скорость движения.

Key words: linear induction motor, model, heating, design elements, the speed of movement.

Общие положения. Сотрудниками Донецкого национального технического университета (Украина), Уральского государственного технического университета (ныне Уральского федерального университета), а также Первомайским электромеханическим заводом (г. Первомайск, Луганской области, Украина) был разработан тяговый электропривод транспортной системы для Междуреченского ГОК «Кемеровоуголь». Многодвигательный электропривод конвейерного поезда (КП) представляет собой совокупность трехдвигательных модулей, рассредоточенных по

всей трассе движения КП в зависимости от ее профиля (угла подъема). Каждый модуль состоит из трех двигателей, устанавливаемых в межрельсовом пространстве путевой структуры, трех передвижных устройств управления и компенсации и одной комплексной трансформаторной подстанции. На рис. 1 приведен общий вид линейного асинхронного двигателя (ЛАД) типа ДАЛ-О-13-11(Ж) УХЛ1 [1,2,3]. Индукторы расположены на полотне дороги, а вторичные элементы – под днищами движущихся вагонов. Номинальные данные двигателя: напряжение 660 В, ток 780 А, частота

сети 50 Гц, активная мощность 150 кВт, скорость 11 м/с. Пусковой ток двигателя 1070 А, максимальное тяговое усилие 18,5 кН. Система транспорта с конвейерными поездами, движущимися по рельсовому пути в виде замкнутого контура значительной протяженности, имеет ряд характерных

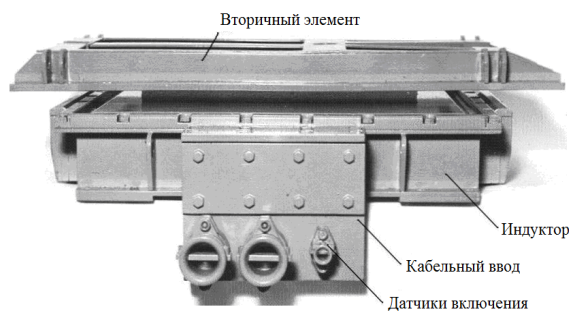


Рис. 1. Общий вид тягового ЛАД

участков: горизонтальные участки загрузки и разгрузки со скоростью движения КП, равной 0,4...0,6 м/с (при загрузке) и 0,6...1,0 м/с (при разгрузке), маршевые участки с малыми углами подъема (до 6...10 градусов) и участки с углами подъема профиля пути до 18...20 градусов.

Выполнялось математическое моделирование тепловых процессов тяговых двигателей поезда при его пуске после аварийной остановки, когда одновременно может быть включено до 54 двигателей и имеет место относительно высокая скорость нарастания температуры их активных частей. Распределение нагрузки между отдельными двигателями поезда достаточно равномерное, что обеспечивается мягкой механической характеристикой (номинальное скольжение 0.25) и одинаковым немагнитным зазором между вторичным элементом и индуктором двигателя. По ходу движения поезда на трассе требуется подключение двигателей, индукторы которых перекрыты вторичным элементом, и отключение двигателей, оставшихся позади поезда. На участках загрузки и разгрузки требования к качеству регулирования скорости невысоки, а полная масса поезда достигает 200...225 т и более, что делает целесообразным использование импульсного способа регулирования скорости движения КП. Моделирование электромагнитных и тепловых режимов осуществлялось с помощью авторских программ на основе детализированных электрических, магнитных и тепловых схем замещения.

Электромагнитный расчет. Электромагнитный расчет производится с использованием многослойной детализированной схемы замещения [4].

При этом полная магнитная схема замещения формируется путем каскадного включения

многополюсников, каждый из которых соответствует магнитной цепи отдельного зубцового деления, как показано на рис. 2. В рассматриваемом случае модель имеет 36 участков (зубцовых делений) по длине индуктора, по 35 участков в левой и правой от индуктора краевых зонах и 14 слоев по высоте зоны моделирования, т.е. сто шесть 14-слойных многополюсников.

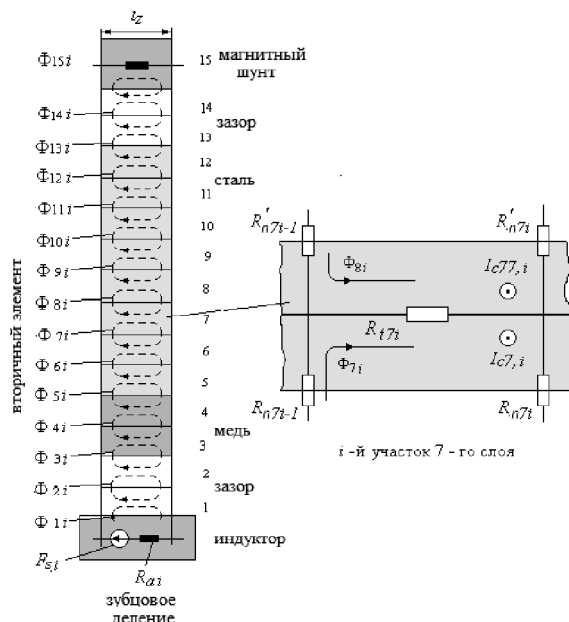


Рис. 2. ДМСЗ зубцового деления двигателя

На схеме замещения обозначены: контурный поток $\Phi_{n,i}$ n -го слоя i -го участка, его нормальное R_n и тангенциальное R_t магнитные сопротивления, пазовая МДС индуктора $F_{s,i}$, индуцированные токи в i -м участке верхнего I_{cni} и нижнего I_{cni} полуслоев, магнитное сопротивление i -го участка ярма индуктора. Значения толщины, относительных нормальной и тангенциальной составляющих магнитной проницаемости, а также электропроводности каждого слоя задаются массивом соответствующих величин (рис. 3) и могут быть уточнены в процессе расчета путем итерационных процедур.

$$\begin{aligned} \mathbf{h} &= 10^{-3} \cdot (7 \ 6 \ 3 \ 3 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 3 \ 3 \ 4 \ 7 \ 8)^T \\ \mu_t &= (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 20 \ 25 \ 30 \ 40 \ 60 \ 100 \ 100 \ 100 \ 1 \ 1)^T \\ \mu_n &= (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 20 \ 25 \ 30 \ 40 \ 60 \ 100 \ 100 \ 100 \ 1 \ 1)^T \\ \gamma_{\text{otn}} &= (0.001 \ 0.001 \ 1 \ 1 \ 0.125 \ 0.125 \ 0.125 \ 0.125 \ \dots \\ &\quad \dots \ 0.125 \ 0.125 \ 0.125 \ 0.125 \ 0.001 \ 0.001)^T \\ \gamma^b &= 57 \cdot 10^6 \frac{1}{\Omega_{\text{M}, \text{M}}} \end{aligned}$$

Рис. 3. Массивы толщин и физических свойств слоев расчетной области (в пакете Mathcad)

Система матричных уравнений магнитного состояния всей цепи записывается в виде

$$\begin{cases} (Z_{01})(\Phi_1) - (\Phi_2) = (R_1^{-1})(F_{0s}), \\ \dots \\ -(r_3)(\Phi_2) + (Z_{03})(\Phi_3) - (\Phi_4) = 0, \\ \dots \\ (R_{25})(\Phi_{25}) + (Z_{26})(\Phi_{26}) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $(r_n) = (R_n^{-1})(R_{n-1})$ и $(Z_{0n}) = (R_n^{-1})(Z_n)$ для $n = 1 \dots 14$, (R_n) и (Z_n) - матрицы магнитных сопротивлений слоев, (Φ_n) - векторы потоков, (F_{0s}) - вектор МДС пазов индуктора. Из решения (1) находятся распределения по участкам и слоям магнитных потоков, нормальных и тангенциальных индукций, индуцированных токов, нормальных и тяговых усилий.

Тепловой расчет. Рассмотрим особенности нагрева элементов индуктора и вторичного элемента (ВЭ) тягового ЛАД в различных режимах работы. Эквивалентная тепловая схема (ЭТС) ЛАД с неподвижным вторичным элементом (модель 1) подобна известным ЭТС обычных вращающихся электрических машин [5,6] и приведена на рис. 4 (ключи K разомкнуты, т.е. ВЭ не выступает за пределы активной зоны индуктора и представлен одной тепловой массой $M2$ в этой зоне). Следует отметить, что в рассматриваемой схеме индуктор изображен сверху и соответствует варианту расположения двигателя на движущемся поезде. Указанная особенность не принципиальна с точки зрения процессов в электроприводе.

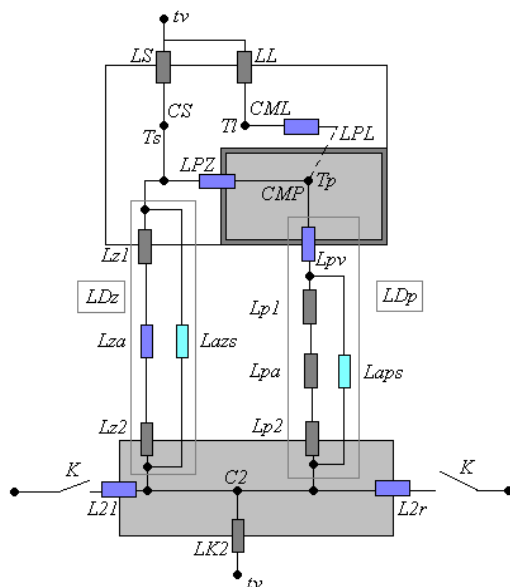


Рис. 4. Интегральная эквивалентная тепловая схема замещения ЛАД

Тепловые массы меди пазовых частей обмотки, ее лобовых частей и сердечника индуктора связаны между собой тепловыми проводимостями теплоотдачи: LS - сердечник - воздух; LL - лобовые части - воздух; $Lz1$ - поверхность зубцов

- воздух; $Lz2$ - поверхность ВЭ, перекрытая зубцами, - воздух; $Lp2$ - поверхность ВЭ, перекрытая пазами, - воздух с учетом теплового сопротивления электроизоляции катушек; $LK2$ - ВЭ - воздух; теплопроводности: LPZ - медь пазов - электроизоляция - сердечник (зубцы); LPL - медь пазов - медь лобовых частей; Lza - воздушный зазор под зубцами; Lpa - воздушный зазор под пазами; $L2l$, $L2r$ - активная часть ВЭ - выступающие пассивные левая и правая части ВЭ; излучения: $Lazs$ - внешние поверхности зубцов - ВЭ; $Laps$ - внешние поверхности катушек в пазах - ВЭ. Если учесть теплоотдачу активной части ВЭ к его выступающим слева и справа пассивным частям (модель 2), получаем такую же ЭТС (рис.4), но при замкнутых ключах.

На рис. 5 показано распределение температур элементов индуктора по его длине в начале, середине и конце интервала времени нагрева t_k при неподвижном ВЭ и детализации активной части двигателя на 4 участка. Видно, что температуры различных участков (с 1-го по 4-й) каждого выделенного элемента конструкции изменяются во времени одинаково

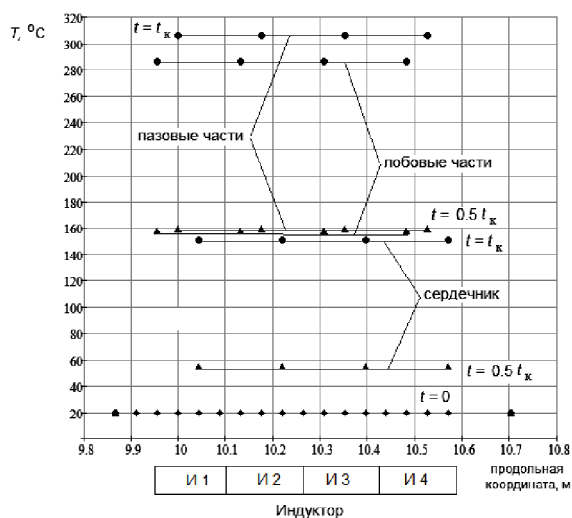


Рис. 5. Распределение температур элементов индуктора по его длине в начале, середине и конце времени нагрева t_k при неподвижном ВЭ

На рис. 6 показаны кривые нагрева, полученные с помощью интегральной ЭТС при учете тепловой связи активной зоны с краевыми зонами неподвижного ВЭ (на схеме рис.4 ключи K замкнуты). Видно, что температуры элементов индуктора и ВЭ в активной зоне существенно снизились за счет «оттока» тепла в выступающие за пределы активной зоны концы ВЭ. Эта особенность принципиально отличает ЛАД от обычного вращающегося двигателя, снижая тепловые нагрузки машины в активной зоне.

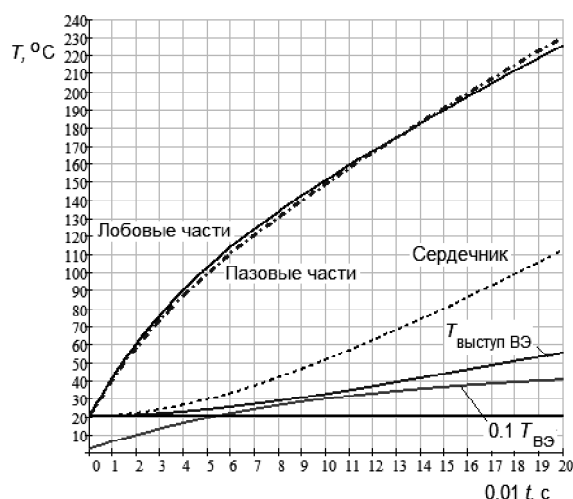


Рис 6. Результаты расчета нагрева элементов двигателя с помощью интегральной ЭТС

На рис. 7 показаны кривые нагрева элементов индуктора и ВЭ при движении поезда со скоростью 0.005 м/с.

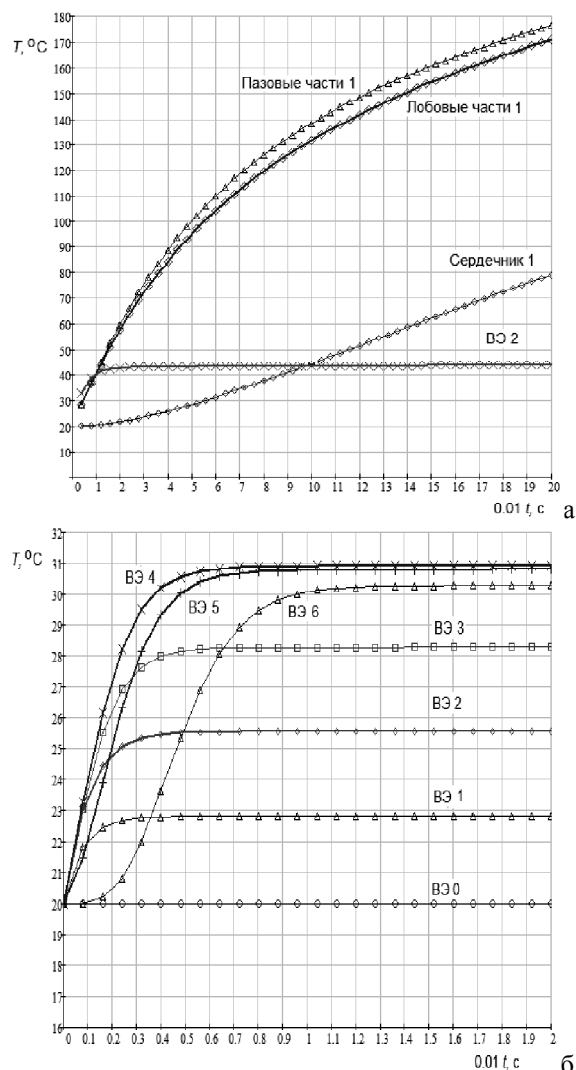


Рис. 7. Кривые нагрева элементов индуктора и ВЭ при скорости 0.005 м/с

Зависимости получены с использованием детализированной ЭТС. Номера участков отсчитываются от участка на входном краю индуктора: 0 – перед входным краем, 1- 4 – в зоне расположения индуктора, более 4 – за пределами выходного края индуктора. Следует при этом учитывать, что на участке с каким-либо номером с течением времени появляются новые менее нагретые участки движущегося ВЭ, заменяя прежние.

Заключение. Результаты проведенных исследований показывают, что использование инструмента детализированных электрических, магнитных и тепловых схем замещения позволяет при малых затратах времени (несколько минут) с помощью компьютеров со скромными вычислительными возможностями рассчитать подробную картину распределения электрических, магнитных и тепловых характеристик двигателя с учетом выноса тепла из активной зоны при движении вторичного элемента. Эти особенности предлагаемого метода расчета характеристик ЛАД особенно необходимы на этапе проектирования транспортных систем с линейными электроприводами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Особенности структуры и режимов работы линейного электропривода конвейерного (тележечного) поезда / П.И. Захарченко, С.В. Карась, Ф.Н. Сарапулов. Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ / Под общей ред. академика НАН Украины Г.Г. Пивняка. Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2007. С. 331-343.
2. Иваненко В.С., Карась С.В. Нагрев двухстороннего линейного асинхронного электродвигателя // Изв. вузов. Горный журнал. – 1987. – №11. – С. 109 – 114.
3. Иваненко В.С., Карась С.В., Бурковский А.Н. Выбор способа охлаждения, тепловой расчет и экспериментальная проверка индуктора низкоскоростного линейного асинхронного двигателя / Взрывозащищенные электрические машины. Сб. науч. тр. ВНИИВЭ. – Донецк: ВНИИВЭ, 1985. – С. 96 – 102.
4. Линейные асинхронные двигатели / О. Н. Веселовский, А. Ю. Коняев, Ф. Н. Сарапулов. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с
5. Беспалов В.Я., Дунайкина Е.А., Мощинский Ю.А. Нестационарные тепловые расчеты в электрических машинах / Под ред. Б.К. Клокова. М.: МЭИ, 1987. 72 с.
6. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения: учебное пособие / Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, П. Шымчак. 2-е издание, перераб. и дополн. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. 431 с.